ABS
Associação Brasileira de Soldagem
XXX CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem
Del 13 al 15 de septiembre del 2004 Rio de Janeiro – RJ

ALIVIO DE TENSION PARA SOLDADURAS MEDIANTE TRATAMIENTO TERMICO Y VIBRACIÓN: UNA COMPARACIÓN ENTRE LOS DOS MÉTODOS.

Giovanni S. Crisi (1)
Danila Pedrogan Mendonça (2)

ABSTRACTO

Aunque todavía no se ha aceptado oficialmente por los códigos americanos de construcción y diseño de tanques presurizados y tuberías, que siguen exigiendo que el alivio de tensión de las soldaduras se haga por calor, el alivio de tensión por vibración ha alcanzado mucha popularidad en los últimos años.
El propósito de este trabajo es hacer una descripción del método de vibración, los principios teóricos en los que se basa, sus procedimientos operativos y el "estado del arte" actual.
El documento se complementa con una sección experimental. Tres piezas de tubería fueron soldadas, una de las cuales se dejó "como fue soldada", la segunda se alivió la tensión por calor y la tercera se alivió la tensión por vibración. Varias muestras de las tuberías fueron cortadas, que se someterán a pruebas de tensión, impacto, dureza y análisis metalúrgico.
Por último, los resultados de las pruebas son presentados, se hace una comparación entre ellas y se discute la conclusión de los autores.

Palabras clave: tensión residual, alivio de tensión, tratamiento térmico, método de vibración

1) Ingeniero Químico. Profesor de la Escuela de Ingeniería Mackenzie, Sao Paulo, Brasil
gscrisi@mackenzie.com.br
(2) Ingeniero de Materiales. Curitiba, Brasil

1. INTRODUCCION

Los métodos actuales para el alivio de tensión residual de las soldaduras son: mecánico, por calor y electromagnético.
El método mecánico puede ser realizado por martillaje o vibración. El método de calor consistirá en calentar toda la pieza soldada o cada soldadura, una por una. El método electromagnético usa la técnica de martillo electromagnético.
En el tratamiento térmico se calienta la pieza hasta que el punto de rendimiento se reduce a menos que el de la tensión residual, que a su vez provoca la distorsión local moldeable, la disminución de la intensidad de la tensión residual y la reducción de la dureza.
El método de vibración introduce energía en la pieza a través de vibraciones. Para la estructura atómica tensa no hay diferencia entre la energía introducida a través del calor y la energía introducida a través de las vibraciones. La energía aplicada reorganiza la estructura cristalina, aliviando la tensión y la estabilizando la pieza, sin distorsión.
Este proceso es especialmente útil para aliviar la tensión de grandes estructuras, por las que el costo del tratamiento por medios eléctricos sería elevado, y para piezas con intensas tolerancias dimensionales, en las que el tratamiento térmico podría causar distorsiones que las superarían.
Los vibradores generalmente utilizados tienen una banda de frecuencia de 0 a 100 Hz. Ellos están conectados a la estructura, que debe ser apoyada en bloques de goma. La frecuencia es aumentada gradualmente hasta alcanzar la primera resonancia. Esta resonancia se mantiene durante un período de tiempo determinado y, entonces, la frecuencia se incrementa de nuevo hasta alcanzar la segunda resonancia y así sucesivamente.

2. FUENTES DE TENSIONES RESIDUALES

Las tensiones residuales en soldaduras son producidas por tensiones localizadas en metal ocurridas inmediatamente después de la soldadura, que son:
A) Tensión de Contracción. Esta es la principal fuente de tensión residual. Tiene lugar durante el enfriamiento de las areas soldadas que han sido sometidas a calor no uniforme.
B) Tensión debido al mayor enfriamiento de la superficie. Cuando una soldadura se enfría la superficie se enfría más rápido que el interior, inclusive si este enfriamiento se produce en aire estacionario. Cuanto mayor sea el espesor, más tensión se genera.
C) Tensión debido a la fase de transformación. Se produce debido a la transformación de la austenita (cubo de cara centrada, fcc) a la ferrita (cubo de cuerpo centrado, bcc), que causa un aumento en el volumen a la que la base de metal se opone.
Los tres tipos de tensión residual usualmente suceden al mismo tiempo. La experiencia demuestra que los efectos individuales de cada uno de ellos pueden ser sobrepuestos linealmente.[1]

[1] Silveira. José Paulo et. al: Tensiones residuales y deformaciones en soldaduras, pg 2.15

3. EFECTOS DE LA TENSION RESIDUAL EN SOLDADURAS

Entre otros, los efectos de la tensión residual en piezas soldadas son los siguientes:
A) La tensión residual es añadida a la carga que la soldadura ha sido diseñada para soportar, que puede conducir al colapso del material.
B) Reducción de la resistencia a la corrosión de la tensión. Las regiones sometidas a resistencia elástica de tensión pueden sufrir corrosión localizada en ambientes agresivos.
C) Riesgo de grietas. Todos los mecanismos de agrietamiento son afectados por tensión residual y distorsión causada por el calor localizado.

4. ALIVIO DE TENSION POR TRATAMIENTO TERMICO

Dependiendo de la forma y el tamaño de la pieza, el tratamiento térmico para alivio de tensión residual se puede llevar a cabo al calentar toda la pieza, o partes de la misma, en un horno; o transformarla en una cámara de combustión mediante la instalación de un quemador temporal en él, o el tratamiento de las soldaduras, una por una, por medio de resistencias eléctricas. Calor por kits exotérmicos, que gozaron de cierta popularidad en los años sesenta y setenta fueron abandonados porque no producen los resultados esperados.

5. ALIVIO DE TENSION POR VIBRACION (ATV)

Basado en el peso de la pieza, el método de ATV introduce vibraciones de alta amplitud y baja frecuencia por un período determinado de tiempo. Esto alivia la tensión residual sin distorsión o alteración del límite de elasticidad, el punto de rendimiento o resistencia a la fatiga, y se restablece el equilibrio estático.
Las vibraciones más eficientes son las resonantes, porque en las vibraciones de frecuencia resonante, la tensión es mejor distribuida si se compara con sub-frecuencia resonante.
Las vibraciones de baja frecuencia llevan energía de alta amplitud y son muy eficaces en la disminución significativa del volumen máximo de tensión residual en piezas metálicas y soldaduras. El equipo empleado generalmente consiste en un vibrador robusto de velocidad variable que se adjunta a la pieza y un panel de control electrónico. Ambos están montados en un gabinete portable. También se adjunta a la pieza un acelerómetro que detecta vibraciones y transmite una señal al panel de control. El punto de resonancia es determinado y luego se proyecta en el tablero. Si el vibrador está equipado con una grabadora, una gráfica también puede ser obtenida.
El punto de resonancia se logra variando la frecuencia de la vibración hasta alcanzar la adecuada. Dos minutos es el tiempo promedio necesario para llegar a la frecuencia de resonancia. En este punto, la vibración se mantiene durante un tiempo determinado en función del peso de la pieza y su aplicación prevista. El tiempo puede variar de diez minutos a una hora o más, pero si se supera, la pieza no sufra ningún daño debido a la fatiga o pérdida del límite de la elasticidad.
Si las estructuras son muy grandes, de largo o tienen espacios abiertos, puede ser necesario aplicar el procedimiento en varios puntos.
Parte del equipo lleva a cabo el proceso de vibración automáticamente. La vibración se mantiene durante 15 minutos, en una secuencia de tres diferentes frecuencias

seleccionadas, cada una de cinco minutos de duración. Esta configuración es eficaz para el tratamiento de piezas con un peso máximo de diez toneladas. Para piezas de un peso de más de diez toneladas, dos períodos de 15 minutos consecutivos pueden usados sin sufrir daño alguno.
Dos simples reglas deben seguirse para todas las aplicaciones:

A) Apoyar la pieza de la mejor manera posible, aislándola del suelo o estructuras rígidas, dejándola libre para que vibre.
B) El vibrador debe estar conectado directamente a la pieza, con el fin de transferir la totalidad de la energía vibratoria generada.

El método se puede utilizar en una amplia gama de metales ferrosos y no ferrosos, incluyendo el carbono y acero inoxidable, hierro fundido, aluminio, titanio, etc, en una gran variedad de formas. Los tamaños pueden variar desde pequeñas piezas soldadas, ejes y engranajes, a grandes estructuras soldadas y maquinarias de acero. Sin embargo, presenta algunas limitaciones: no es eficaz en materiales moldeados, trabajados en frío y endurecidos por precipitación.
Una de las ventajas más importantes de la utilización del método ATV es su capacidad para aliviar la tensión en cualquier punto del proceso de fabricación, como después del mecanizado, enganches, perforación o moleduras. En partes soldadas, el alivio de tensión se puede realizar durante la soldadura, muy útil para evitar la concentración de tensiones residuales que pueden causar deformaciones de la pieza. El método es especialmente compatible con procesos de soldadura SMAW, GMAW y GTAW, popularmente conocidos como bara de electrodos, MIG y TIG. Con otros procesos de soldadura se pueden levantar algunos problemas logísticos.

6. MIDIENDO EL ALCANCE DEL ALIVIO DE TENSION

Hasta hace poco no había un método confiable para la medición precisa de la tensión residual, que no sólo procedía de la soldadura, sino también de la forjadura, manipulación en frío y otros tipos de trabajos en metal. Ahora, con el uso de difractometría con rayos X, el problema ha sido resuelto.
En el pasado, la única manera de verificar si la tensión residual se ha reducido a un nivel aceptable era por analogía con dureza. Es un hecho bien conocido que los materiales se endurecen cuando son sometidos a tensión. La experiencia adquirida a lo largo de los años, en los que las normas aplicables se siguen basando, demostró que si la dureza medida después del alivio de la tensión que se ha realizado es inferior a un valor empírico determinado, el tratamiento había tenido éxito.
Esta condición es especialmente importante si la soldadura fue para estar en contacto con ambientes corrosivos como es el caso de la industria química. Es bien sabido que dependiendo del medio ambiente, los metales muestran una menor resistencia a la corrosión si son sometidos a tensión residual.[2]

Este hecho se tiene en cuenta en el Código para Tuberías a Presión ASME / ANSI B 31. Sección 31,3 que se utiliza en las industrias de proceso, tales como las refinerías de petróleo y plantas químicas, declara la máxima dureza permitible en soldaduras después

[2] Silveira, José Paulo et al.: Op. cit., pg 4.13

del alivio de tensión. Este requisito no existe en la Sección B 31.1, que se utiliza en plantas de energía, donde la posibilidad de corrosión es mucho menor.

Hasta hace muy poco, difractometría por rayos X presentaba un grave problema operacional. El equipo era demasiado grande para ser tomado al sitio de uso, y, en muchos casos, la soldadura no podía ser tomada hasta el equipo. Esta situación ha sido superada por el desarrollo de equipos suficientemente pequeños como para ser trasladados de un lugar a otro.

Los códigos aplicables, sin embargo, sigen considerando la Dureza como parámetro decisivo en la aprobación del alivio de tensión y ésta es la razón por la que la hemos adoptado en la Sección Experimental.

7. SECCION EXPERIMENTAL

La parte experimental de este estudio consistió en comparar los resultados del alivio de tensión realizado por calor y por vibraciones de las soldaduras hechas en el mismo material, acero semiduro ASTM A 106 grado B, cuya composición química se muestra en la Tabla 1. Tres 4 pulgadas de diámetro, cuadro de 40 piezas de tuberías fueron soldadas con la soldadura situada en el centro. La primera pieza no fue sometida a ningún tipo de tratamiento, la segunda fue sometida a tratamiento térmico y la tercera a ATV. El electrodo usado fue E-6010 para el primer paso y E-7018 para el resto. Después de la soldadura y antes del tratamiento las tuberías fueron maquinadas para eliminar la soldadura de refuerzo, es decir, tener una superficie similar externa de tuberías.

Tabla 1: Composición química del acero ASTM A-106 grado B

Elementos	%
Carbono	0,30 max
Manganesio	0,29 - 1,06
Fósforo	0,035 max
Azufre	0,035 max
Silicio	0,10 max

7.1. Tratamiento Térmico

El tratamiento térmico se llevó a cabo en el horno del Laboratorio de Metalurgía de la Escuela de Ingeniería Mackenzie, de acuerdo con la Norma ASME / ANSI B 31,3. El calentamiento se llevó a cabo a una velocidad máxima de 315ºC/h hasta alcanzar la temperatura de inmersión de 650 º C, momento en que el tubo se mantuvo durante 30 minutos adicionales. A continuación, el horno se apaga y se deja enfriar con el tubo en el mismo.

7.2. Alivio de Tensión por Vibración

Una empresa en la ciudad de Sao Paulo que posee equipo para ATV ofreció amablemente su ayuda, realizando el tratamiento en la tubería de muestra. El tratamiento se hizo de acuerdo con el Manual de Instrucciones del equipo. El tubo fue firmemente

asegurado y la frecuencia de vibración se aumentó gradualmente hasta que se alcanzar la resonancia y mantenida durante diez minutos. Luego, se apagó el vibrador.

7.3. Prueba de elasticidad

Todas las pruebas se llevaron a cabo de acuerdo reglamentos de la norma API 1104. Tres muestras fueron cortadas, una de cada tubo, teniendo las dimensiones señalas en la Tabla 2. Las muestras fueron aseguradas en la máquina Amsler del Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mackenzie, llevándolas a la ruptura. El índice de carga fue de 600 N/s (~60 kgf/s). En todos los casos, la ruptura se produjo en la base de metal y no en la soldadura o HAZ. La Tabla 3 muestra la información resultante de las pruebas.

Tabla 2: Dimensiones de las muestras antes de las pruebas.

Dimensiones	Sin Tratamiento	ATV	Tratamiento Térmico
Ancho, mm	25,3	25,3	25,3
Largo, mm	225,0	225,0	225,0
Grosor, mm	6,25	6,25	6,40
Longitud (L0), mm	125,0	125,0	125,0

Tabla 3: Resultados de las Pruebas

Mediciones	Sin Tratamiento	ATV	Tratamiento Térmico
Carga de Rendimiento kN (kgf)	52,0 (5300)	52,0 (5300)	44,9 (4580)
Carga Maxima, kN (kgf)	74,7 (7620)	75,9 (7746)	68,6 (7000)
Carga de Ruptura kN (kgf)	60,2 (6140)	61,8 (6300)	53,9 (5500)
Longitud (Lf), mm	148,4	148,4	153,9

Los cálculos de las pruebas de elasticidad son mostrados en la Tabla 4

Tabla 4: Cálculos de las pruebas de elasticidad

Parámetro	Sin Tratamiento	ATV	Tratamiento Térmico
Punto de Rendimiento MPa (kgf/cm^2)	328,7 (3352)	328,7 (3352)	277,4 (2829)
Tensión Máxima MPa (kgf/cm^2)	472,6 (4819)	480,4 (4899)	423,9 (4323)
Tensión elástica final MPa (kgf/cm^2)	380,8 (3883)	390,7 (3984)	333,1 (3397)
Elongación (%)	18,76	18,74	23,12

7.4 Prueba de Impacto

Las muestras para la prueba de impacto tienen las mismas dimensiones que las de la prueba de elasticidad con la adición de dos cortes laterales en el talón de soldadura, tal como lo exige la norma API 1104. Las tres muestras fueron sometidas a pruebas de impacto en la máquina Charpy, a temperatura ambiente, con un martillo de 30 kg. Ninguna de las muestras se rompió. Los resultados se presentados en la Tabla 5.

Tabla 5: Prueba de Impacto

	Sin Tratamiento	ATV	Tratamiento Térmico
Energía absorbida kJ (kgf.m)	284,4 (29)	285,4 (29,1)	285,2 (29,08)

7.5 Dureza Brinell

La dureza Brinell se midió en las tres piezas, con una bola de 10 mm de diámetro y una carga de 3,000 kgf (~30,000 kN). El tamaño de las impresiones y sus correspondiente dureza se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Dureza Brinell

	Sin Tratamiento	ATV	Tratamiento Térmico
Diámetro de la muesca, mm	4,10	4,53	4,45
Dureza BHN	217	178	183

7.6. Metalografía

Después de ser pulidos, los especímenes fueron cargados con nital por casi 5 segundos y sus microestructuras observadas en el microscopio metalográfico. Los resultados se describen a continuación.
Como era de esperar, las micrografías del metal base original muestran una alineación de los granos, lo que indica que el material fue fabricado por laminación térmica.
La soldadura esta básicamente constituida por ferrita con una configuración dendrítica debido a la alta temperatura soportada durante el proceso de soldadura. Como también existe carbono, la parte oscura visible en las micrografías es probablemente perlita.
En la interfaz de la soldadura con el HAZ, granos oscuros de perlita son visibles, con ferrita alrededor de los granos, que forman una red alrededor de la perlita. Cuanto más cerca los granos de perlita estan a la soldadura, más grande es su tamaño, ya que fueron expuestos a temperaturas más altas que los que estaban más lejos.
También se observó que ni el método de vibración o el tratamiento térmico altera la estructura metalográfica original del material.

8. CONCLUSIONES

En primer lugar, se observa que mientras las muestras que habían sido tratadas con calor reflejan una disminución de la resistencia a la tensión y un aumento de la elongación, como era de esperar, el método de vibración prácticamente no altera esos valores, no se tiemplan, normalizan o endurecen por calor ni modificar las propiedades mecánicas del material. [3]

En segundo lugar, las energías absorbidas en la prueba de impacto son prácticamente las mismas. Ninguna de las muestras se rompió, lo que indica que el material soldado es

[3] Stress Relief Engineering Co.: Método de Vibración Resonante para reducir tensiones residuales en soldaduras o fabricaciones de maquinaria, pg 5.

dúctil porque tiene una cantidad considerable de ferrita, como se puede observar en las micrografías. La disminución en la dureza resultante de ambos tratamientos fue similar, lo que indica una reducción efectiva de tensiones residuales.

La conclusión de que se podría alcanzar sería que el calor y métodos de vibración son equivalentes para propósitos prácticos. Los autores acuerdan, sin embargo, que una prueba realizada con una sola pieza de la muestra tratada con cada método no es suficientemente representativa para llegar a conclusiones válidas. No obstante, los autores creen que la conclusión preliminar de este trabajo puede alentar a otros investigadores a considerar seriamente la posibilidad de una investigación más a fondo del método de vibración para alivio de la tensión.

En algunos casos, el alivio de tensión por vibración puede ser utilizado como una opción más conveniente para el tratamiento térmico, como por ejemplo cuando la pieza es demasiado grande para ser transportada y colocada en un horno. En estos casos, la posibilidad de llevar a cabo el alivio de tensión en el lugar, sin necesidad de mover la pieza es una clara ventaja. Un ejemplo sería una torre petroquímica.
Por otra parte, piezas en cantidades grandes y fáciles de manejar, como secciones de tuberías prefabricadas, pueden ser convenientemente termo tratadas en un horno por grupos.

9. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a las siguientes empresas:

- Browne Dreyfus International Ltd, de la ciudad de Nueva York, por el suministro gratuito de material bibliográfico y otra información.
- Promenge Industria e Comercio Ltda., de Sao Paulo, Brasil, por la preparación sin costo de los tubos utilizados en la sección experimental.
- Voith Paper Máquinas e Equipamentos Ltda., de Sao Paulo, Brasil, por llevar a cabo el alivio de tensión por vibración de uno de los tubos, también de forma gratuita.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

SILVEIRA, José Paulo y MONTEIRO de BARROS, Stenio: “Tensoes residuais e deformaçoes em soldagem (Tensión Residual y distorsión en soldaduras)”, una publicación interna de Petrobrás, Rio de Janeiro, Brasil, sin fecha.
STRESS RELIEF ENGINEERING Co.: “Método de Vibración Resonante para reducir tensiones residuales en soldaduras o fabricaciones de maquinaria”, Costa Mesa, EE.UU, 1990.
KOICHI, M.: “Análisis de estructuras soldadas: tensiones residuales, distorciones y sus consecuencias”, Nueva York, Prensa Pergamon, 1980.
BOUHELIER, C.; BARBARIN, P.; DEVILLE, P. y MIEGE, B.: “Alivio de tensión por vibración para partes soldadas y relajamiento mecánico para tensiones residuales”, Filadelfia, L. Mordfin, 1988.